

南方主要河流水沙变化及人类活动的影响

王延贵¹, 吴钰川¹, 刘焕永¹, 陈康²

(1. 中国水利水电科学研究院国际泥沙研究培训中心, 北京 100048;

2. 山东省水利勘测设计院有限公司, 山东 济南 250013)

摘要: 为了解我国南方河流的水沙变化及主要成因, 利用 Mann-Kendall 检验法和水文量累积曲线法, 分析了南方主要河流代表站径流量和输沙量的变化特征, 探讨了影响南方河流水沙变化的主要因素。结果表明, 长江、珠江、钱塘江和闽江等南方河流代表站年径流量都没有显著的变化态势; 除钱塘江代表站外年输沙量都有显著减少趋势; 钱塘江 2016—2020 年为平水平沙期, 2011—2020 年为平水多沙期, 其他河流 2016—2020 年和 2011—2020 年均为平水少沙期; 影响南方河流水沙变化的人类活动包括水库拦沙、水土保持措施、河道采砂、流域过度建设等, 其中水库拦沙是南方河流减沙的主要措施, 水土保持措施在南方河流减沙过程中发挥了重要作用, 河道采砂对河道减沙也发挥了一定的作用。

关键词: 南方河流; 水沙变化; 水库拦沙; 水土保持; 河道采砂

中图分类号: P333

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)05-0016-07

Variations of water and sediment and impact of human activities in major rivers in southern China//WANG Yangui¹, WU Yuchuan¹, LIU Huanyong¹, CHEN Kang² (1. International Research and Training Center on Erosion and Sedimentation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2. Shandong Provincial Hydraulic Survey and Design Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China)

Abstract: In order to understand the variations and causes of water and sediment in major rivers in southern China, the variation characteristics of runoff and sediment load at representative stations are analyzed and main influencing factors are investigated using the Mann-Kendall test method and the hydrological accumulation curve method. The results show that the annual runoff at representative stations of the main southern rivers such as the Yangtze River, the Pearl River, the Qiantang River and the Minjiang River has no significant change trend. The annual sediment load at representative stations in the southern rivers has a significant decreasing trend except for the Qiantang River. The Qiantang River experienced a normal runoff and sediment load period from 2016 to 2020, and a normal runoff and high sediment load period from 2011 to 2020. However, the other rivers experienced a normal runoff and low sediment load period from 2016 to 2020 and from 2011 to 2020. The main factors affecting runoff and sediment load include reservoir sediment retention, water and soil conservation measures, sand mining from rivers, and excessive construction. Among them, reservoir sediment retention is the main measure responsible for sediment reduction in southern rivers, water and soil conservation measures play an important role, and sand mining from rivers also plays a certain role in river sediment reduction.

Key words: rivers in southern China; water and sediment variations; reservoir sediment retention; water and soil conservation; sand mining from rivers

根据河流流域年降水量与河流位置, 可把我国主要河流分为南方河流或湿润地区河流、北方河流或半干旱地区河流、内陆干旱地区河流^[1]。其中, 南方河流主要指位于秦岭-淮河以南地区的河流, 包括长江、珠江、钱塘江、闽江等。南方河流流经湿润

地区, 降水多, 汛期较长, 河流水量丰富, 其流域内的植物生长茂盛, 水土流失较轻, 河流含沙量小。例如珠江、闽江、钱塘江都属于少沙河流, 其多年平均年输沙量分别为 6 392 万、576 万、291 万 t。南方河流流域内人类活动频繁, 流域产流产沙发生变化, 导致

基金项目: 社会公益类科研机构改革专项(沙标准修订 ZL02242201); 国家自然科学基金项目(U2243213); 国家重点研发计划项目(2021YFE0113800)

作者简介: 王延贵(1963—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: Wangyg@iwhr.com

通信作者: 陈康(1991—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事流域水沙演变、水利规划与战略研究。E-mail: chen kang@giwp.org.cn

南方河流水沙条件发生变化,特别是河道输沙量显著减小。河流水沙变化对河流功能发挥、河道整治、水资源利用等具有重要影响,在水利规划、防洪减灾、水资源开发、水土保持及生态环境建设等方面的工作中,河流水沙变化问题也是必须考虑的主要因素。因此,全面了解我国南方河流水沙变化态势及人类活动的影响是十分必要的。国内外学者针对河流水沙变化开展了较多的研究^[2]。例如:Walling^[3]分析了全球典型河流水沙变化特点;许全喜等^[4-5]利用水文资料较系统地分析了长江流域不同河段在不同时段的水沙变化特性;杜俊等^[6]分析了人类活动对长江上游输沙的影响;杜以超等^[7-8]利用数学方法分析了珠江代表水文站的水沙变化和主要驱动因素;胡春宏等^[9]分析了典型河流水沙变化态势及主要影响因素。但是这些成果多为某一河流的水沙变化或者没有包括近期变化特点,涉及南方主要河流的成果仍然较少。

表 1 南方主要河流代表站水沙变化与特征值

河流	代表站	控制流域 面积/万 km ²	年径流量						年输沙量			
			平均值/亿 m ³			趋势分析		平均值/万 t			趋势分析	
			多年	2011— 2020 年	2016— 2020 年	<i>U</i>	变化 趋势	多年 平均	2011— 2020 年	2016— 2020 年	<i>U</i>	变化趋势
长江	大通	170.54	8 983.0	9 100.0	9 674.0	0.24	无	35 100.0	11 939.0	12 162.0	-8.32	显著减小
珠江	高要、石角、博罗	41.52	2 836.0	2 856.0	3 011.0	-0.19	无	6 392.0	2 295.0	2 507.0	-5.02	显著减小
钱塘江	兰溪、诸暨、 上虞东山	2.44	208.0	242.5	235.1	1.50	无	290.7	362.1	269.7	0.47	无
闽江	竹岐、永泰	5.85	576.0	589.7	612.30	-0.24	无	576.0	202.1	272.1	-5.19	显著减小
合计		220.35	12 603	12 788	13 532.5			42 358.7	14 798.6	15 211.3		

注:U 为 M-K 秩次相关检验的统计量,当 |U|≥3.01 时,水文量显著变化;当 1.96<|U|<3.01 时,水文量发生变化;当 |U|≤1.96 时,水文量无明显变化。

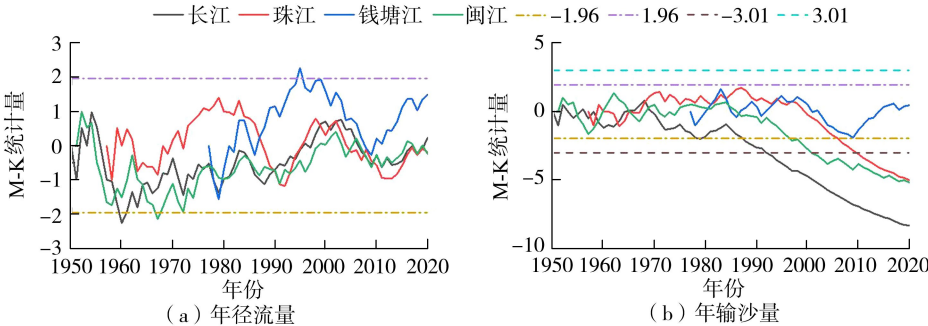


图 1 南方主要河流代表站径流量和输沙量 M-K 统计量变化过程

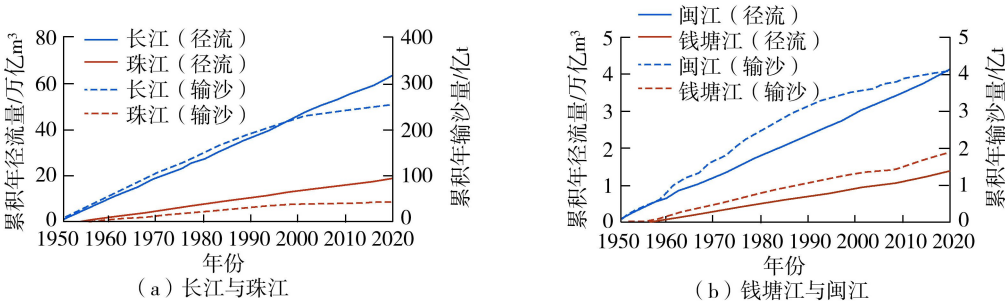


图 2 南方主要河流代表站累积径流量和输沙量的变化过程

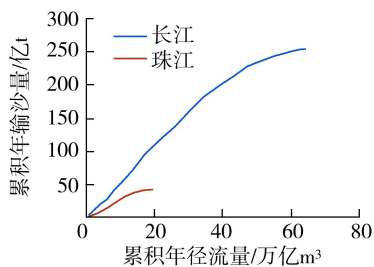
本文根据《中国河流泥沙公报》发布的我国南方河流代表水文站径流量和输沙量资料,利用 Mann-Kendall(M-K)秩次相关检验法和水文量累积曲线法分析我国南方河流径流量和输沙量的变化特征,进而从水库建设、水土保持、河道采砂等方面分析人类活动对南方河流水沙变化的影响,以期为流域内的工程建设和泥沙管理提供参考。

1 南方主要河流水沙变化特征

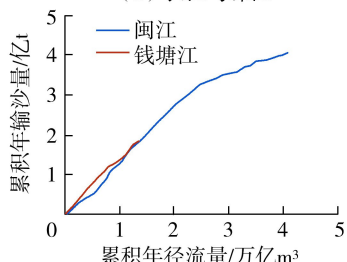
根据《中国河流泥沙公报》公布的 1950—2020 年水沙资料,我国南方主要河流代表站的水沙变化与特征值如表 1 所示。

1.1 水沙变化特点

图 1、图 2 和图 3 分别为我国南方主要河流代表站径流量和输沙量的 M-K 统计量过程线、累积过程线和双累积关系曲线,南方河流径流量和输沙量变化特征如下:



(a) 长江与珠江

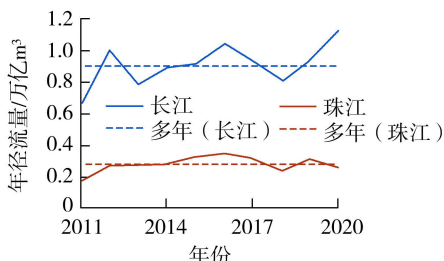


(b) 钱塘江与闽江

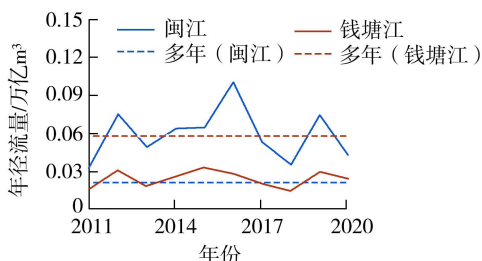
图3 南方主要河流代表站径流量和输沙量的双累积关系曲线

a. 除长江、钱塘江和闽江局部时段外,多年来南方河流(包括长江、珠江、钱塘江与闽江)的年径流量 M-K 统计量基本在+1.96 和-1.96 之间变化。2020 年 M-K 统计量为-0.238~1.497,其绝对值小于 1.96,且年径流量的单累积过程线基本呈直线形态,表明南方河流的年径流量没有明显变化趋势,在多年平均径流量上下波动。

b. 在南方主要河流中,钱塘江代表站年输沙量的 M-K 统计量经历了减小-回升的过程,2020 年的值为 0.47,其绝对值小于 1.96,对应的年输沙量单累积过程线总体上呈直线形态,表明钱塘江年输沙量无明显变化趋势;其他南方主要河流(长江、珠江、闽江)代表站年输沙量的 M-K 统计量经历了持

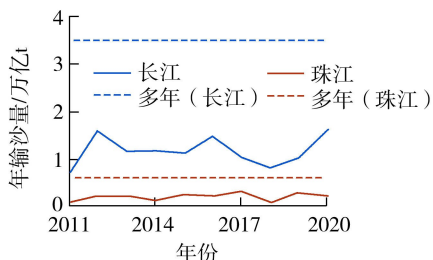


(a) 长江与珠江

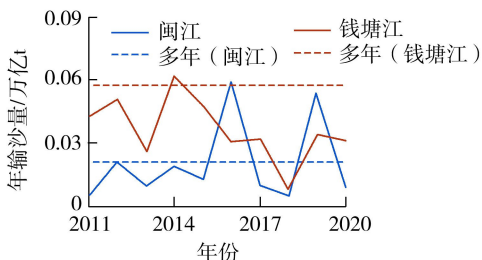


(b) 钱塘江与闽江

图4 2011—2020 年南方河流年径流量及其多年均值



(a) 长江与珠江



(b) 钱塘江与闽江

图5 2011—2020 年南方河流年输沙量及其多年均值

续减小或波动减小的过程,其 2020 年的 M-K 统计量介于-5~-9 之间,绝对值大于 3.01,对应的累积曲线总体上呈上凸状态,表明这些南方河流的年输沙量都有不同程度的显著减少,以长江年输沙量的减小幅度最大,长江代表站年输沙量从 20 世纪 50 年代的 5.04 亿 t 减少至 2010 年后的 1.25 亿 t,减幅高达 75.20%。

c. 钱塘江代表站水沙双累积关系曲线基本呈直线形态,表明钱塘江代表站水沙变化基本上是同步的,来水含沙量没有趋势性变化;长江、珠江和闽江代表站水沙双累积关系线呈上凸形态,表明这 3 条河流代表站输沙量减小幅度大于径流量的变化幅度,来水含沙量呈逐渐减小趋势。

1.2 近期水沙变化特征

以《中国河流泥沙公报》发布的泥沙资料为基础,进一步分析 2011—2020 年南方主要河流年径流量与年输沙量的变化特点,结果分别如图 4、图 5 所示。南方 4 条主要河流代表站多年平均径流量为 12 603 亿 m^3 ,多年平均输沙量为 42 358.7 万 t。比较南方主要河流代表站 2011—2020 年和 2016—2020 年平均水沙特征值及其与多年平均水沙特征值(表 1)可知:

a. 4 条河流代表站 2011—2020 年和 2016—2020 年平均径流量分别为 12 788 亿 m^3 和 13 532.5 亿 m^3 ,2011—2020 年平均径流量与多年平均值基本持平,其中钱塘江代表站偏大 16.59%,其他河流基本持平(0.71%~2.38%);2016—2020 年平均径流量比多年平均值偏大 7.38%,各河流偏大 6.17%~13.03%。

b. 4 条河流水文代表站 2011—2020 年和 2016—2020 年平均输沙量分别为 14 798.6 万 t 和 15 211.3 万 t,比多年平均输沙量分别偏小 65.06% 和 64.09%; 2011—2020 年钱塘江代表站偏大 24.56%,其他河流偏小 64.1%~65.99%; 2016—2020 年钱塘江代表站偏小 7.22%,其他河流偏小 52.76%~65.35%。

c. 参考国家标准 GB/T 50095—2014《水文基本术语和符号标准》,钱塘江 2016—2020 年为平水平沙期,2011—2020 年为平水多沙期;其他河流 2016—2020 年和 2011—2020 年均平水少沙期。

2 影响南方河流水沙变化的主要人类活动

影响河流水沙变化的因素包括自然因素和人类活动两个方面。自然因素包括流域下垫面条件、降水等,对于同一流域,地质地貌条件一般相对稳定,流域降水的趋势变化也是一个长期过程,因此流域下垫面形态(地表地貌)、降水的变化在水文尺度上看都是比较小的,对河流水沙变化的影响也较小,但一定时段的降水变化将对河道的径流、输沙产生影响。流域人类活动主要包括水土保持、水库修建、河道采砂、生产建设等,这些人类活动将直接或间接地影响河流的径流量和输沙量,造成河流水沙变化。因此,在水文尺度上,除自然因素中的流域降水变化外,影响水沙变化的主要因素是人类活动,南方河流中主要包括水库拦沙、水土保持措施、河道采砂、流域过度建设等^[1,10-11]。

2.1 水库拦沙

南方河流中修建了大量的水库枢纽,水库修建在改变径流过程的同时,将会拦截大量的泥沙,造成大量泥沙淤积在水库,使得进入下游河道的输沙量大幅减少,因此水库拦沙在河道输沙量减少中发挥了重要作用。在长江流域、珠江流域和东南河流上,修建了大量的大型水库。根据王延贵等^[1]和中国水利统计年鉴的统计,截至 2019 年,长江流域已建成大型水库有 272 座,总库容达 2 723 亿 m³;珠江流域(不含海南省)已建成大型水库 108 座,总库容为 1 053 亿 m³;钱塘江流域已建成大型水库 16 座,总库容为 268 亿 m³;闽江干流及其支流上有 8 座大型水库,总库容为 68 亿 m³。这些水库调蓄了年内径流过程,拦截了大量泥沙,减少了出库的输沙量,明显地改变了进入下游河道的水沙过程,而且河道输沙量持续减少的突变年份与河道骨干水库蓄水运行的年份相一致。如图 6 所示,引入输沙模数和流域水库调控系数(定义为河道上游水库总库容与径流量的比值),进一步分析南方河流水库拦沙对河流

减沙的作用,指出南方河流输沙模数随流域水库调控系数呈指数关系衰减。

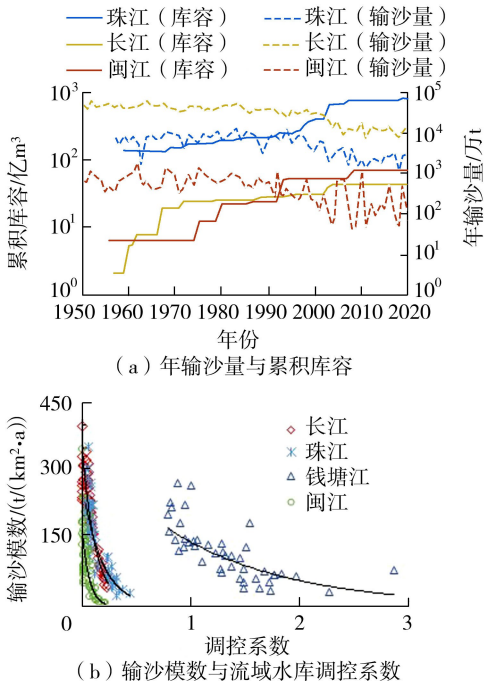


图 6 典型南方河流输沙参数与水库参数的关系

2.2 水土保持措施

由于人类活动的影响,流域局部区域水土流失严重。经过水土流失治理工作,流域水土流失面积不断减少,如图 7 所示。水土保持措施能够降低雨水的侵蚀能力,减少土壤流失,通过拦截滞蓄降水,减缓地表径流产生速度,提高流域的水源涵养能力。在长江流域,部分区域水土流失曾比较严重,如上游水土流失最为严重的地区有“四大片”,即金沙江下游及毕节地区、嘉陵江中下游、陇南陕南地区和三峡库区^[12],其水土流失面积为 17.05 万 km²,占其土地总面积的 56%。自 20 世纪 80 年代以来,长江流域水土流失防治经历了由试点小流域到重点防治的发展历程,据长江流域利用遥感技术进行的 3 次全流域水土流失调查可知,20 世纪 80 年代中期、1990 年末、2011 年末长江流域水土流失面积分别为 62.2 万、53.1 万、38.46 万 km²,分别占总面积的 34.56%、29.50%、21.37%,水土流失面积逐渐减少。根据长江流域水土保持公报和长江泥沙公报,至 2006 年长江流域累计治理水土流失面积已达 28.4 万 km²,2006—2015 年长江流域累计治理水土流失面积 14.73 万 km²,2016—2020 年国家水土保持重点工程治理水土流失面积为 2.07 万 km²。长江流域实施水土保持工程以来,水土流失严重的产沙区得到了控制,使得进入河道的输沙量减少,如金沙江、岷江、嘉陵江和乌江的年输沙量和输沙模数分别从 2000 年、1993 年、1989 年、2000 年开始显著减少,表明

1989 年起实施的长治工程在不断发挥作用。

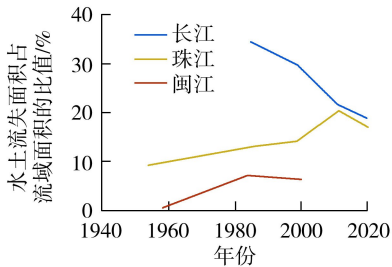


图7 南方河流典型流域水土流失变化

在其他南方河流流域,水土流失与水土保持工作经历了不同的变化过程,水土流失面积并没有呈现逐渐减小的过程。由于珠江流域人类活动频繁,珠江上游区域喀斯特地貌和石漠化治理难度较大^[13],珠江流域的水土流失面积并没有呈现逐渐减少的趋势,据全国第一次、第二次土壤侵蚀遥感调查、全国第一次水利普查等有关资料显示^[14-15],1954 年、20 世纪 80 年代中期、1990 年末和 2011 年末珠江流域水土流失面积分别为 4.11 万、5.71 万、6.27 万、9.64 万 km²,分别占流域土地总面积的 9.3%、12.9%、14.2%和 21.8%,呈明显的增加态势。与珠江流域水土流失面积变化的过程相对应,珠江流域的年输沙量也经历了一个先增加后下降的过程,其变化态势与水土保持措施实施过程有一定的差异。闽江流域水土流失面积经历了先增加、后减少、再增加的过程^[16],1958 年以前仅有 294.47 km²,1977 年以后以每年 106.93 km² 的速度增加,1984 年水土流失面积一度达到 4 436.7 km²,随着流域水土保持措施的实施,2000 年闽江流域水土流失减至 3 939.38 km²。

2.3 河道采砂

河道采砂造成河道下切,河道局部过水面积增大,采砂断面水流流速减小,致使采砂河段发生泥沙淤积,直接减小了下游河道的来沙量。表 2 为南方

主要河流采砂状况^[10,17]。南方主要河流都有大量的采砂活动,长江上游 20 世纪 90 年代的年采砂量为 293 万~1 530 万 t^[17-18],占同期河道输沙量的 2.79%~5.29%;长江中下游河道 2004 年以来年均采砂量为 3 844 万 t^[1],占河道输沙量的 28.69%。在珠江流域河道采砂是比较多的^[19-21],西江河口段 1992—1998 年年均采砂量为 1741 万 t,占高要站同期输沙量的 23.90%,北江和东江采砂河段的采砂量占河道输沙量的比例高达 227.37%~717.45%。对于钱塘江和闽江^[22-23],河道采砂依然严重,河道采砂量占河道来沙量的比例都超过 173.91%。南方主要河流如此高比例的采砂活动,一方面直接造成河道断面下切^[10],对河势演变产生影响;另一方面导致河砂资源入不敷出,来砂量与采砂量严重失衡,通过河道采砂坑的回淤减少河道输沙量,为河道输沙量变化发挥了一定的作用。

2.4 流域过度建设

流域过度建设主要是指开展大范围的荒地开垦、开矿修路、森林砍伐等活动后,未实施生态环境保护和水土保持措施,使得水土流失面积和土壤侵蚀量增加的建设活动。如 20 世纪 50 年代末对长江上游森林进行了大量砍伐^[24],加上农村人口急增,致使四川在 20 世纪 60 年代森林覆盖率一度跌至 9%,岷江、嘉陵江和乌江等主要支流在 20 世纪 60 年代都出现年输沙量增加的现象;20 世纪 50—80 年代,珠江流域的森林发生了严重的人为破坏^[25],1975—1984 年广东省的森林覆盖率从 38%猛降至 27%;同时在 20 世纪 50 年代末,中国南方河流上也开始修建水利工程,如珠江流域 1958—1961 年修建水库 15 座,总库容达 234.73 亿 m³,但未对周边实施水土保持措施,同样会导致水土流失面积和河道输沙量的增加。改革开放初期,修路、开矿、办工厂等快速发展的同时,没有充分重视水土保

表 2 南方主要河流采砂状况

河流	采砂位置	河道输沙量		采砂		
		年均输沙量/万 t	水文站	采砂时间	采砂量/万 t	采砂量占来沙比例/%
长江	上游(四川宜宾、泸州、重庆河段)	35 670	朱沱站、北碚站	1990—1999 年	1 530	4.29
	上游(重庆主城区)	14 322	朱沱站、北碚站	2010—2014 年	400	2.79
	上游(重庆主城区)	5 537	朱沱站、北碚站	2015—2020 年	293	5.29
	中下游	13 398	大通站	2004—2020 年	3 844	28.69
珠江	北江(大塘以下河段)	475	石角站	1995—2002 年	1 080	227.37
	北江(芦苞、大塘河段和清远市区河段)	144	石角站	2003—2004 年	650	451.39
	东江(下游横沥至石龙河段)	212	博罗站	1972—2004 年	1 521	717.45
	西江(河口段)	7 285	高要站	1992—1998 年	1 741	23.90
钱塘江	富春江河段	230	兰溪站、诸暨站	1990—2000 年	400	173.91
	杭州河段(一桥至三桥河段)	87	兰溪站、诸暨站	2003—2005 年	1 446	1 658.26
闽江	下游水口以下河段	532	竹岐站、永泰站	1984—1998 年	1 000	187.97
	下游水口以下河段	221	竹岐站、永泰站	1999—2002 年	738	333.94

持措施,造成流域水土流失加重,长江支流的岷江、嘉陵江、乌江等支流的年输沙量在 20 世纪 80 年代初期也出现增加的现象。例如岷江高场站 20 世纪 80 年代的输沙量为 5 708 万 t,比 1950—1979 年的均值增加了 15%;珠江上游喀斯特地区随着人口数量的增加,曾出现乱砍滥伐、陡坡开荒、坡耕地耕种、过度放牧等农业生产及采矿、交通道路建设等不合理的开发建设活动,对石漠化发生发展产生较大影响^[17],促使石漠化面积增加,森林面积减少,西江高要站和北江石角站 20 世纪 80 年代的输沙量分别为 7 774 万 t 和 673 万 t,分别比 1950—1979 年的均值增加了 11% 和 28%;闽江流域漳龙高速所经之处,丘陵山地的地表植被将受到严重的破坏,预计直接破坏的林地面积为 147 hm²,致使山地植被的水土保持功能下降,输沙量增加^[26]。

2.5 主要影响因素的作用

流域水土保持措施、水库拦沙、河道采砂、流域过度建设等人类活动对水沙变化的作用具有很大的差异,其中水土保持和流域过度建设都是改变流域下垫面条件,前者减少水土流失,后者则增加水土流失;水库拦沙与河道采砂都是河道内的人类活动,对河道输沙量的影响是直接和明显的。对于植被较好的南方少沙河流,水土保持的作用并不突出,而过度建设对植被破坏的作用还是明显的,局部地区需要采取水土保持措施;鉴于南方河流的输沙量相对较小,水库拦沙量与采砂量占河道输沙量的比例较高,其作用较大。目前,影响河道输沙量变化的因素和机理仍然比较复杂,缺少水土保持和水库泥沙淤积的实测资料,河道采砂量也很难准确统计,因此,全面定量分析河道输沙量减少的主要影响因素仍然存在较多困难,关于河道输沙量减少影响因素贡献率的研究成果仍然较少,只有一些局部或者粗略的分析研究。在长江干流^[27],与基准期(1968 年前)相比,1969—2002 年期间大通站的气候变化对径流量和输沙量变化的贡献率分别为 68.02% 和 4.67%,人类活动的贡献率分别为 31.98% 和 95.33%;2003—2015 年期间大通站气候变化对径流量和输沙量变化的贡献率分别为 40.25% 和 2.63%,而人类活动的贡献率分别为 59.75% 和 97.37%。自 1989 年开始长江流域上游实施长治工程以来^[10],对嘉陵江、乌江等支流输沙量的减少发挥了重要作用,同时长江支流修建了大量的水利工程,拦截了大量的泥沙,在 Wang 等^[5]研究成果的基础上,王延贵等^[1]通过分析嘉陵江、岷江和乌江水库拦沙和水土保持的作用,给出了长江上游流域降水、水库拦沙和水土保持措施在减沙中的贡献率分别为 12.15%、

55.35% 和 32.50%。

3 结 论

a. 南方河流(包括长江、珠江、钱塘江与闽江)代表站年径流量没有明显的趋势性增加或减少;除钱塘江代表站年输沙量无明显变化趋势外,其他南方主要河流代表站年输沙量都有显著减少趋势,长江代表站年输沙量的减小幅度较大,从 20 世纪 50 年代的 5.04 亿 t 减少至 2010 年后的 1.25 亿 t,减幅高达 75.20%。

b. 钱塘江 2016—2020 年为平水平沙期,2011—2020 年为平水多沙期;其他河流 2016—2020 年和 2011—2020 年均均为平水少沙期。

c. 影响南方河流水沙变化的主要人类活动包括水库拦沙、水土保持措施、河道采砂、流域过度建设等,其中水库拦沙是南方河流减沙的主要措施,水土保持在南方河流减沙过程中发挥重要作用,河道采砂对河道减沙也发挥了一定的作用。

参考文献:

[1] 王延贵,史红玲,陈吟,等. 中国主要河流水沙态势变化及其影响[M]. 北京:科学出版社,2023.

[2] 刘成,何耘,刘桢. 河流输沙量变化的主要驱动因素[J]. 水利水电科技进展,2017,37(1):1-7. (LIU Cheng, HE Yun, LIU An. Key drivers of changes in sediment loads of rivers[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(1): 1-7. (in Chinese))

[3] WALLING D E. The impact of global change on erosion and sediment transport by rivers: current progress and future challenges[M]. Paris: UNESCO, 2009.

[4] 许全喜,童辉. 近 50 年来长江水沙变化规律研究[J]. 水文, 2012, 32(5): 38-47. (XU Quanxi, TONG Hui. Characteristics of flow and sediment change in Yangtze River in recent 50 years[J]. Journal of China Hydrology, 2012, 32(5): 38-47. (in Chinese))

[5] WANG Yangui, CHEN Yin. The influence of human activity on variations in basin erosion and runoff-sediment relationship of the Yangtze River[J]. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 26(1): 68-77.

[6] 杜俊,师长兴,张守红,等. 人类活动对长江上游近期输沙变化的影响[J]. 地理科学进展, 2010, 29(1): 15-22. (DU Jun, SHI Changxing, ZHANG Shouhong, et al. Impact of human activities on recent changes in sediment discharge of the Upper Yangtze River[J]. Progress in Geography, 2010, 29(1): 15-22. (in Chinese))

[7] 杜以超,罗孝文,王峻,等. 近 70 年珠江水沙变化特征及人类活动影响因素分析[J]. 海洋学研究, 2022, 40(4): 52-64. (DU Yichao, LUO Xiaowen, WANG Jun, et al. Characteristics of runoff and sediment discharge in the Pearl River Basin in recent 70 years and analysis on the

- affecting factors of human activities[J]. Journal of Marine Sciences, 2022, 40(4): 52-64. (in Chinese))
- [8] 戴仕宝, 杨世伦, 蔡爱民. 51 年来珠江流域输沙量的变化[J]. 地理学报, 2007, 62(5): 545-554. (DAI Shibao, YANG Shilun, CAI Aimin. Variation of sediment discharge of the Pearl River Basin from 1955 to 2005 [J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(5): 545-554. (in Chinese))
- [9] 胡春宏, 王延贵, 张燕菁, 等. 中国江河水沙变化趋势与主要影响因素[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 524-532. (HU Chunhong, WANG Yangui, ZHANG Yanjing, et al. Variation tendency of runoff and sediment load in China major rivers and its causes [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 524-532. (in Chinese))
- [10] 王延贵, 胡春宏, 刘茜, 等. 长江上游水沙特性变化与人类活动的影响[J]. 泥沙研究, 2016(1): 1-8. (WANG Yangui, HU Chunhong, LIU Xi, et al. Study on variations of runoff and sediment load in the Upper Yangtze River and main influence factors [J]. Journal of Sediment Research, 2016(1): 1-8. (in Chinese))
- [11] GUO Wenxian, LI Yue, WANG Hongxiang, et al. Temporal variations and influencing factors of river runoff and sediment regimes in the Yangtze River, China [J]. Desalination and Water Treatment, 2020, 174: 258-270.
- [12] 廖纯艳, 韩凤翔, 冯明汉. 长江上中游水土保持重点防治工程二十年建设成效与经验总结[R]. 武汉: 长江委水土保持局, 2010.
- [13] 王敬贵, 亢庆, 杨德生. 珠江上游水土流失与石漠化现状及其成因和防治对策[J]. 亚热带水土保持, 2014, 26(3): 38-41. (WANG Jinggui, KANG Qing, YANG Desheng. Current status of soil erosion and rock desertification in the Upper Pearl River Basin and their causes and control strategies [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2014, 26(3): 38-41. (in Chinese))
- [14] 马永, 范建友, 胡惠方, 等. 珠江流域水土保持区划[J]. 人民珠江, 2016, 37(7): 44-48. (MA Yong, FAN Jianyou, HU Huifang, et al. Soil and water conservation planning of Pearl River drainage area [J]. Pearl River, 2016, 37(7): 44-48. (in Chinese))
- [15] 珠江水利委员会农水处. 珠江流域水土流失状况及治理情况[J]. 人民珠江, 1992(5): 5-8. (Agricultural Water Management Division of the Pearl River Water Resources Commission. Status of soil erosion and management in the Pearl River Basin [J]. Pearl River, 1992(5): 5-8. (in Chinese))
- [16] 赵其国. 我国南方当前水土流失与生态安全中值得重视的问题[J]. 水土保持通报, 2006, 26(2): 1-8. (ZHAO Qiguo. Some considerations for present soil and water conservation and ecology security of south China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(2): 1-8. (in Chinese))
- [17] 吴正涛. 长江上游干流河道采砂状况与管理思考[J]. 人民长江, 2006, 37(10): 23-24. (WU Zhengtao. Sand mining in the trunk channel of Upper Yangtze River and management [J]. Yangtze River, 2006, 37(10): 23-24. (in Chinese))
- [18] 泥沙评估课题专家组. 三峡工程泥沙问题评估报告[R]. 北京: 中国工程院泥沙评估项目组, 2015: 7.
- [19] 冒浩文, 余利花. 河道采砂管理条例: 千呼万唤快出来(新闻观察)[N]. 华南新闻, 2004-09-30(03).
- [20] 聂红海. 过量采砂对东江下游及其三角洲水文水资源的影响与对策[J]. 人民珠江, 2007(4): 82-84. (NIE Honghai. Negative influence of excessive sand excavation on downstream and delta area of Dongjiang River and countermeasure study [J]. Pearl River, 2007(4): 82-84. (in Chinese))
- [21] 钱挹清. 珠江三角洲河道无序采砂影响及管理措施[J]. 人民珠江, 2004(2): 44-46. (QIAN Yiqing. Effects of disordered sand borrowing in river channels in the Pearl River delta and management measures [J]. Pearl River, 2004(2): 44-46. (in Chinese))
- [22] 江海洋, 卢祥兴, 余其坤, 等. 大规模采砂后富春江富阳河段河床演变分析[J]. 泥沙研究, 2002(4): 64-68. (JIANG Haiyang, LU Xiangxing, YU Qikun, et al. Fluvial process of Fuyang reach of Fuchun River after exploiting sand in a large scale [J]. Journal of Sediment Research, 2002(4): 64-68. (in Chinese))
- [23] 陈坚, 余兴光, 李东义, 等. 闽江口近百年来海底地貌演变与成因[J]. 海洋工程, 2010, 28(2): 82-89. (CHEN Jian, YU Xingguang, LI Dongyi, et al. Characteristics of underwater morphology evolution of the Minjiang Estuary in recent 100 years and its reasons [J]. The Ocean Engineering, 2010, 28(2): 82-89. (in Chinese))
- [24] 蓝勇. 历史上长江上游的水土流失及其危害[N]. 光明日报, 1998-09-25(07).
- [25] 夏汉平. 论长江与珠江流域的水灾、水土流失及植被生态恢复工程[J]. 热带地理, 1999, 19(2): 124-129. (XIA Hanping. Flood disasters, soil erosion, and eco-restoration of vegetation in the Yangtze and the Pearl River valleys [J]. Tropical Geography, 1999, 19(2): 124-129. (in Chinese))
- [26] 陈宏荣, 夏卫平. 公路建设可能产生的水土流失及防治措施: 以漳龙高速公路漳州境段为例[J]. 福建水土保持, 2001, 13(3): 34-36. (CHEN Hongrong, XIA Weiping. Potential soil erosion & prevention measures in the road construction: a case study of the Zhangzhou section of the Zhanglong expressway [J]. Fujian Soil and Water Conservation, 2001, 13(3): 34-36. (in Chinese))
- [27] 彭涛, 田慧, 秦振雄, 等. 气候变化和人类活动对长江径流泥沙的影响研究[J]. 泥沙研究, 2018, 43(6): 54-60. (PENG Tao, TIAN Hui, QIN Zhenxiong, et al. Impacts of climate change and human activities on flow discharge and sediment load in the Yangtze River [J]. Journal of Sediment Research, 2018, 43(6): 54-60. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-10-26 编辑: 俞云利)